

УДК 621.039.58

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРЕДЕЛА ПО АКТИВНОСТИ ИОДА В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ РБМК И ЧИСЛА ДЕФЕКТНЫХ ТВЭЛОВ

Краюшкин А.В., Смирнова А.К. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)
e-mail: smirnova_ak@nrcki.ru

Известно, что правилами ядерной безопасности устанавливаются пределы безопасной эксплуатации реактора по числу дефектных твэлов. Соблюдение этих пределов контролируется с помощью реперного радионуклида ^{131}I , удельную активность которого в теплоносителе периодически определяют. По этой удельной активности также устанавливается предел безопасной эксплуатации. В РБМК он принят равным $3,7 \cdot 10^5$ Бк/л.

Предположение о том, что зависимость между удельной активностью ^{131}I и числом негерметичных твэлов не является достаточно строгой, высказывалось ранее и обсуждается, например, в статье [1] для ВВЭР, но без количественных оценок. Представляет интерес количественный анализ этой зависимости применительно к РБМК.

Радиоактивный ^{131}I поступает в теплоноситель из дефектных твэлов и выводится, в основном, за счет очистки и осаждения на поверхностях контура. Изменение активности иода в теплоносителе определяется по формуле

$$\frac{dA}{dt} = Q - \lambda A - \lambda_0 A,$$

где A — активность; Q — скорость поступления ^{131}I из дефектных твэлов; λ , λ_0 — постоянная радиоактивного распада и выведения иода из теплоносителя соответственно.

Целью настоящего сообщения является количественная оценка активности ^{131}I в теплоносителе в зависимости от числа дефектных твэлов. Детальный анализ различных составляющих выведения иода из теплоносителя представляет собой достаточно сложную задачу и не является предметом настоящей статьи.

В стационарном состоянии

$$Q - \lambda A - \lambda_0 A = 0; \quad A = Q/(\lambda + \lambda_0).$$

Соответственно удельная активность

$$a = \frac{A}{M} = \frac{Q}{M(\lambda + \lambda_0)} = \frac{q_1 N_d}{M(\lambda + \lambda_0)}, \quad (1)$$

где M — масса теплоносителя в контуре; q_1 — средняя скорость поступления ^{131}I из одного твэла в теплоноситель; N_d — число дефектных твэлов.

Предположим, что ^{131}I согласно требованиям правил ядерной безопасности поступает в теплоноситель только из 0,1% общего числа твэлов при контакте с топливом. Выход из твэлов с дефектом типа газовой неплотности, которых должно быть не более

1%, примем равным нулю. Это предположение не повлияет на вывод данных исследований. Из формулы (1) следует, что удельная активность прямо пропорциональна числу дефектных твэлов. Вследствие относительно небольшого периода полураспада 8 сут активность ^{131}I в топливе быстро выходит на стационарный уровень. Из-за снижения энерговыделения с выгоранием далее активность будет медленно уменьшаться, однако этим можно пренебречь. Часть ^{131}I , накапливаемого в диоксиде урана, будет выходить под оболочку твэла, а при ее дефекте в теплоноситель. В стационарном состоянии реактора можно записать

$$q_1 = \xi q_t \delta; \quad q_t = \lambda A_t,$$

где $0 < \xi \leq 1$ — доля ^{131}I , вышедшего под оболочку твэла и поступившего в теплоноситель; q_t , A_t — скорость накопления и активность ^{131}I в диоксиде урана в расчете на один твэл соответственно; δ — доля ^{131}I , выходящего под оболочку.

Тогда вместо выражения (1) можно записать

$$a = \frac{\xi \delta \lambda A_t N_d}{M(\lambda + \lambda_0)}.$$

Для определения доли ^{131}I , выходящего под оболочку, использовалась расчетная модель, основанная на решении уравнения диффузии продуктов деления в топливной таблетке в r — z -геометрии. Параметры модели, включая температурную зависимость коэффициента диффузии, были подобраны на основе экспериментов [2]. Приведем основные предположения и выводы.

Диффузия описывается уравнением

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \nabla D \nabla N - \lambda N - \Sigma N + q, \quad (2)$$

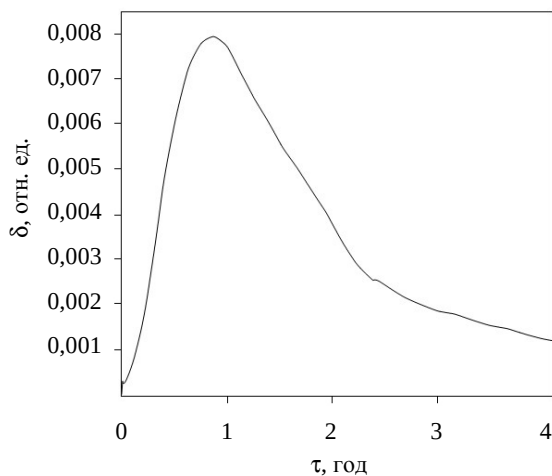
где N — концентрация рассматриваемого радионуклида; D — коэффициент диффузии; Σ — величина, учитывающая утечку радионуклида из зерен диоксида урана в поры и далее за его пределы; q — скорость накопления радионуклида при делении и распаде предшественников.

Ключевым параметром является коэффициент диффузии [3]

$$D = A \exp(-B/T) + 1,41 \cdot 10^{-25} \sqrt{n} \exp(-13800/T) + 2 \cdot 10^{-40} n,$$

где T — температура диоксида урана; n — плотность делений. Исходные значения для констант A и B корректировались с целью получить коэффициент диффузии, обеспечивающий приемлемые результаты как при нормальной работе реактора, так и при аварийном нагреве топлива. Корректировка свелась к существенному увеличению параметра A и небольшому изменению параметра B . Кроме того, параметр A принимается постоянным до температуры $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, при большей температуре снижается по соотношению $A(T) = A(1400\text{ }^{\circ}\text{C})\chi(T)$, где $\chi(T)$ уменьшается от 1 при $T \leq 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ до 0,07 при $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температуре выше $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ используется $\chi(T) = \chi(2000\text{ }^{\circ}\text{C})$. Такое снижение отражает отступление от экспоненциального закона в температурной зависимости коэффициента диффузии при температуре больше $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, что обсуждается в работе [4].

В уравнении (2) ΣN описывает некое внутреннее поглощение, при котором радионуклид выходит из топлива и поступает под оболочку. Здесь $\Sigma = 12D\xi/d_3^2$, где ξ — доля пор с открытым выходом; d_3 — размер зерна диоксида. Уравнение (2) решается в двумерной r — z -геометрии конечно-разностным методом с граничными условиями $N = 0$ на торцах и боковой поверхности цилиндра, включая центральное отверстие в таблетке, если оно есть, и нулевыми начальными условиями. В каждом шаге по времени на границах цилиндра вычисляется утечка и определяется концентрация радионуклидов, выходящих из диоксида урана через геометрические поверхности. К этому количеству добавляется внутренняя утечка, определяемая как интеграл по объему величины ΣT . Накопленное количество радионуклидов в диоксиде урана и вне его определяется суммированием за время облучения с учетом радиоактивного распада. Расчетная зависимость доли ^{131}I , выходящего под оболочку твэла, от времени нахождения ТВС в реакторе показана на рисунке. В начале кампании ТВС его



Зависимость доли ^{131}I , выходящего под оболочку твэла из топлива, от времени

содержание в топливе повышается и увеличиваются градиенты, определяющие утечку. Температура топлива в начале кампании составляет $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, максимальный выход $\sim 0,8\%$. Затем концентрация выходит на стационарное значение, температура топлива снижается вследствие уменьшения мощности ТВС. Скорость выхода также снижается с уменьшением коэффициента диффузии, вызванного снижением температуры топлива и уменьшением зазора топливо—оболочка с выгоранием. Это обуславливает средний выход ^{131}I по кампании $0,4\%$ — в первой и второй половине кампании $0,6$ и $0,2\%$ соответственно. Эти данные относятся к герметичному твэлу. Абсолютный выход из негерметичных твэлов может отличаться, однако соотношение по частям кампании ТВС сохранится.

Активность ^{131}I в теплоносителе и ее соотношение с числом негерметичных твэлов будут существенно зависеть от распределения по кампании дефектных твэлов. Например, если при равномерном по кампании распределении некоторого числа дефектных твэлов активность ^{131}I находится на уровне, соответствующем пределу, то при сосредоточении дефектных твэлов во второй половине кампании для достижения предела по активности их число должно быть увеличено примерно вдвое. При еще большем смещении расположения дефектных твэлов к концу кампании увеличение составит 3—4 раза. Такое повышение может привести к нарушению предела по числу дефектных твэлов, не обнаруживаемому при контроле с помощью реперного радионуклида ^{131}I .

Необходимо отметить, что исследование в настоящей работе ограничивалось средней по активной зоне ТВС, мощность которой изменяется с выгоранием. При учете пространственной неравномерности ТВС в зоне плато или на периферии проблема необнаруживаемого нарушения предела по числу дефектных твэлов только усугубится.

Таким образом, при установлении пределов по удельной активности йода в теплоносителе следует учитывать зависимость выхода ^{131}I из негерметичного твэла при прочих равных условиях от его выгорания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лузанова Л.М., Дубков А.П., Мигло В.Н., Тимошин Н.А. Современные подходы и принципы анализа радиационных последствий для проектируемых и эксплуатируемых АЭС с ВВЭР. — Атомная энергия, 2011, т. 110, вып. 1, с. 48—54.
2. Бабайцев В.Н., Гераскин И.Н., Краюшкин А.В., Смирнова А.К. Применение диффузионной модели для расчета выхода радионуклидов из топлива. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019, вып. 1, с. 74—82.

3. Jackson P., Turnbull J., White R. Enigma fuel performance code. — Nucl. Energy, 1990, v. 29, № 2, p. 107—114.
4. Петров Л.В., Шмельков Ю.Б., Звонарев Ю.А. Моделирование выхода радиоактивных продуктов деления при тяжелой аварии на ВВЭР с помощью модуля

МАВР-ТА. — В сб.: Конф. молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике». Москва, НИКИЭТ, 25—26 ноября 2015 г., с. 120.

Поступило в Редакцию 03.07.19

УДК 621.039.548

ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТВЭЛОВ С ОБОЛОЧКОЙ ИЗ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ХОДЕ ИСПЫТАНИЙ В РЕАКТОРЕ

Бурукин А.В., Долгов А.И., Ижutow А.Л., Ильин П.А., Калыгин В.В., Мокеичев М.А.
(АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград), Угрюмов А.В., Долгов Ю.Н. (АО «ТВЭЛ», г. Москва)
e-mail: aidolgov@niiar.ru

Для повышения надежности и конкурентоспособности твэлов водо-водяных энергетических реакторов разрабатывают новые оболочечные материалы, в частности, циркониевые сплавы, которые обеспечат большую коррозионную стойкость и меньшее формоизменение при эксплуатации. Послереакторными исследованиями как экспериментальных твэлов, облученных в исследовательских реакторах, так и полномасштабных, извлеченных из штатных ТВС, определено изменение их размера при облучении [1—3]. Однако такие данные характеризуют лишь конечное состояние твэла. Для глубокого понимания зависимости формоизменения твэла от выгорания топлива необходимо знать геометрические параметры при эксплуатации. Периодически измерять длину и диаметр штатных твэлов на стендах инспекции АЭС не представляется возможным из-за строго регламентированного времени перегрузки и планово-предупредительных работ, поэтому такие исследования чаще всего проводят при испытании твэлов в составе экспериментальных ТВС в исследовательских реакторах.

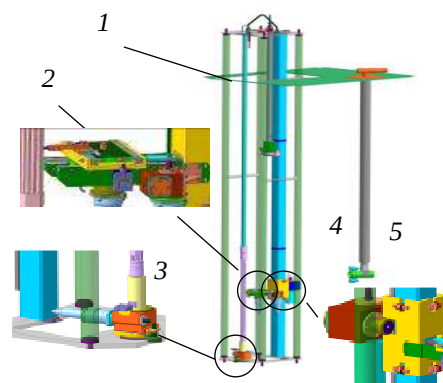
В петлевой установке реактора МИР в условиях, моделирующих работу штатной ТВС, были испытаны экспериментальные твэлы с проведением промежуточных исследований на стенде инспекции, размещенном в бассейне выдержки [4, 5]. Программа исследований включала визуальный осмотр твэлов и элементов ТВС, измерение диаметра оболочек и высоты твэлов наружного ряда с помощью специальной радиационно-стойкой телекамеры и специального измерительного модуля. В результате получены данные об изменении диаметра и высоты экспериментальных твэлов при облучении до среднего выгорания ~ 32 МВт·сут/кг.

Конструктивная схема стенда инспекции показана на рис. 1. Для измерения диаметра и визуальной инспекции твэлов на двухкоординатном столе смонтирован измерительный модуль, или телекамера, ко-

торая совместно с приводами стола обеспечивает наведение датчика на исследуемый твэл, а также его позиционирование относительно поверхности твэла. Перемещение стола в горизонтальной плоскости, а также вращение ТВС осуществляют с помощью погружных шаговых двигателей. Угол поворота ТВС и координаты стола задают системой управления стенда и выводят на экран монитора.

Измерение высоты экспериментальных твэлов. Высоту твэлов и геометрические параметры конструктивных элементов ТВС определяют путем наведения телекамеры на соответствующие элементы и фиксирования вертикальной координаты положения телекамеры. Необходимый размер вычисляют как разность координат.

Высоту твэлов измеряют за один проход телекамеры между границами элемента, например, для твэла от нижней до верхней заглушки или наоборот. Для уменьшения погрешности измерения наведение на границы объекта осуществляют при неизменном приближении телекамеры и минимально возможной скорости без смены направления перемещения и фикса-



Р и с. 1. Конструктивная схема стенда инспекции: 1 — каркас; 2 — двухкоординатный стол с модулем измерения диаметра; 3 — ТВС; 4 — гнездо с приводом; 5 — телекамера; 6 — каретка с приводом